

A Study on the Impacts of Climate Change on Forests in China

气候变化 对中国森林影响研究

徐德应 郭泉水 阎 洪 等著

**Xu Deying
Guo Quanshui
Yan Hong**

中国科学技术出版社

A Study on the Impacts of Climate Change on Forests in China

气候变化对中国森林影响研究

徐德应 郭泉水 阎 洪 等著

**Xu Deying
Guo Quanshui
Yan Hong**

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

气候变化对中国森林影响研究/徐德应等著. —北京:中国科学技术出版社,1997

ISBN 7-5046-2388-1

I. 气… II. 徐… III. 气候变化—气候影响—森林—中国—研究 IV. S718.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 11341 号

中国科学技术出版社

北京海淀区白石桥路 32 号 邮政编码:100081

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防科工委印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:10.75 插页:4 字数:268 千字

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:40.00 元

序 言

我们只有一个地球，而这个地球却在受到严重的威胁。几个世纪以来工业的发展带来了巨大的科学进步，同时也带来了难以克服的环境问题。全球变化，包括气候变化和环境污染，正在使人们忧心忡忡。

森林是地球生物圈的重要组成部分，是能在一定程度上调节环境的为数不多的积极因素。充分认识气候变化对森林生态系统的影响，进而制定相应的对策，对于保护人类生存环境、指导林业的发展具有非常重要的意义。目前气候变化对森林生态系统的影响已受到世界各国的普遍关注，并已成为生态学与环境科学中一个非常活跃的研究领域。

森林主要是受气候制约的，我国年均降雨量大于400毫米的地区能生长森林，从北（漠河北纬 $53^{\circ}31''$ ）到南（南沙群岛 $4^{\circ}15''$ ）的广大东部陆地，依次分布着寒温带针叶林，温带针阔混交林，温带落叶阔叶林，亚热带常绿阔叶林，热带季雨林、雨林和赤道珊瑚岛常绿阔叶林。长期以来很多学者从事着森林植物与气候水热因素相关关系的研究。70年代电脑普遍应用后，建立数学模型的研究逐渐增多。本书作者提出了一个新的GREEN森林生态信息模型，采用了768个气象基本观测站的7种数据，它们是海拔高程，年平均降水量，年平均温度，最冷月平均最低温度，最热月平均最高温度，旱季月数，极端最低温度等等。应用这个模型模拟纯林（如杉木、马尾松、油松等）和东北红松针阔混交林的地理分布时，结果与实际分布相当吻合。

作者还对大气二氧化碳浓度增值和全球增温等对森林分布、森林生产力，树木物候、树木的生理生态等方面的影响以及适应气候变化的中国林业对策进行了研究，提出了许多颇具新意的理论观点。当然，现在对气候变化的科学预测还不能达到十分精确，再加上森林又是历时数百年以至数千年的一个具有适应性并在不断演替的生态系统，因此研究气候变化对森林影响的难度是很大的。作者用了最新的科学研究手段，在这一领域中向前迈出了一大步。希望作者继续探索，以便对经济建设作出更大的贡献。是为序。

中国科学院院士

阳含熙 (阳含熙)

1997年4月

前 言

森林是陆地生态系统的主体，是地球生物圈的重要组成部分，在维护地球生态平衡中发挥着巨大作用。森林的生长周期长，因此充分认识气候变化对森林生态系统的影响，进而制定相应的对策，对于保护人类生存环境、指导林业的发展具有非常重要的现实意义。近年来，气候变化对森林生态系统的影响已受到世界各国的普遍关注，并已成为生态学与环境科学中一个非常活跃的研究领域。

本书为我国首次出版的一本就气候变化对森林影响研究的科技专著。书中展示了我国气候变化对中国森林影响研究的最新成就和发展状况，主要内容包括：气候变化对世界森林影响的研究概况，气候变化对森林分布影响的框架模型，气候变化对中国主要造林树种和珍稀濒危树种地理分布的影响，气候变化对中国森林生产力的影响，二氧化碳浓度增加对红松和兴安落叶松幼苗生理生态的影响，气候变化对森林结构的影响以及适应全球气候变化的中国林业对策。

众所周知，植被的地理分布和气候条件是密切相关的。关于植被的地理分布对气候的依赖关系，大家公认最早对其研究的是 Humbolt (1805)。关于植物和植被分布如何受气候条件控制，是属于植物地理学的研究范围。除了 Humbolt 根据植被分布建立起一套气候分类学以外，德国的 Walter (1931)，美国的 Cain (1941)，俄国的 Wulff (1943) 也作出很多贡献。后来，Holdridge (1947, 1967) 提出了一套生命带生态学的方法，相当准确地确定了植被分布对于气候条件的依赖关系。目前国际上关于气候变化对植被带影响的大范围生物地理模型，大多采用 Holdridge 的生命带分类系统或经过改进的系统。它们把植被分布和少数的几个气候因子联系起来。Holdridge 用的是三个气候参数：生物温度（大于 5℃ 的年积温）、年降雨量和潜在蒸散。目前国际上最新的模型采用了一些新的指标，并把研究对象从植被类型发展为植物的功能类型 (PFT)，以改进模型的精度，例如 BIOME、MAPSS 和 IMAGE。国外在这方面已发表了很多论文。

研究未来气候变化对森林的影响，首先要进行未来气候变化的预测，这项工作唯有利用气候预测模型。近 30 年来，世界各国的气候学家已创建了大量的气候模式，用来预测气候的变化。目前国际上使用比较普遍的气候模式大约有 20 余个。但多数学者认为，对气候变化的预测还有很大的不确定性，而且在 5~10 年内不会有根本性的改进。我们采用的是根据 7 个全球大气环流模型 (GCMs) 预测合成的 2030 年的气候预测情景。当然，这并不意味着它比单个 GCM 模型的预测更准确，只能说它也许不比单个模型更差。

由于气候预测以及森林对于气候的反应还存在很大的不确定性，所以我们认为建立一种能根据气候预测很快地更新预测结果的框架模型是非常重要的。所谓框架模型，在这里指的是一个或一组完整的计算机模型，它能够根据适宜树种地理分布的气候参数区间，很快地确定和预测不同气候条件下的森林分布。一旦有了更准确的气候预测，用这个框架模型能很快地更新预测结果。

生态信息系统 GREEN 就是为实现上述目标而研制的一种框架模型。该模型是根据地理信息系统原理,用 TURBO PASCAL 计算机语言编制而成。在模型的研制过程中,采用了拉普拉斯光滑薄板样条函数插值方法进行的地区分块模拟插值,在高精度数字海拔模型的基础上拟合的各气候要素的三维空间分布。这一软件的数据库中含有:海拔高程,年平均温度,最冷月平均最低温度,最热月平均最高温度,年平均降水量,旱季月数,绝对最低温度等。根据适宜树种分布的气候参数区间,它可以用图形方式显示气候要素和树种的地理分布。同时还可通过移动光标,查询中国版图上任一地点的地形和气候要素数值。通过交互验证的误差分析结果表明,应用该模型预测的温度值的误差小于 0.5 度,降水量的误差小于 10%。

在气候变化对森林地理分布影响的研究中,能否准确地模拟当前气候条件下森林的地理分布状况,对预测未来气候条件下森林地理分布变化的准确性关系很大。在本项研究中,我们选择的对象是纯林(如杉木、马尾松、油松、云南松)和以一个树种为主的森林功能类型(如红松针阔混交林)。这样就避免了由于牵涉多个树种和多种生态适应性而难于确定植被类型的分布边界问题。此外,在我们的模型中,还将海拔高度作为限制树种分布的一个变量,而且是根据树种分布的大量实际调查资料来确定其分布位置。应用实践表明,由计算机模拟的树种分布与树种的实际分布是相当吻合。

在气候变化对中国森林生产力影响的研究中,我们主要依据中国森林第一性生产力的实测数据和与其相匹配的气候变量构建森林气候生产力模型。该模型中除涉及气候变量外,还引入了海拔高度等地形因素。目前国际上通用的生产力模型,如 Lieth 模型,筑后模型等只考虑了气候变量。应用我们所构建的气候生产力模型借助于 GIS,用图形表现中国森林第一性生产力的地理分布与实测值比较,取得了较好的拟合效果,能够客观地反映中国现实森林第一性生产力的分布格局,显著提高在经度、纬度、垂直高度等三维地理空间上模拟预测森林生产力的精度。因此使用该模型预测的气候变化后的森林生产力变化有很大的可信度。

应用我们自行研制的二氧化碳浓度自控装置,通过实验研究了二氧化碳浓度增加和气候变暖对红松、兴安落叶松幼苗生理生态反应,填补了国内这一研究领域的空白,该项研究不仅提供了二氧化碳浓度增加和气候变暖对树木幼苗生理生态影响的实验数据,而且在研究过程中还积累了丰富的经验,为我国今后继续开展有关方面研究奠定了坚实的基础。

在气候变化对中国树木物候及生育期影响的研究中,我们应用了我国近 30 年的气候和物候资料,在论证了气温是影响中国木本植物物候主要因子的基础上,建立了物候与年平均气温的线性统计模式,并以此模式分别计算了未来全球年平均气温升高 0.5~2.0℃ 和未来大气二氧化碳浓度倍增情况下我国木本植物物候期的变幅。

尽管未来气候的预测和我们了解的植被和物种适应气候变化的反应过程还存在着较大的不确定性,但考虑到有些不确定性终究在短期研究内不可能得到理想的科学解释,而且现实也不允许我们等待气候变化已经非常明显后才作出反应。为此我们应用已有的知识和气候变化对我国主要造林树种影响预测的结果,从良种选育、人工造林、森林经营、森林生物多样性保护、森林病虫害防治、森林防火等几个方面,对适应全球气候变化应采取的林业对策进行了探讨,为我国制定持续发展的林业策略提供了参考依据。

本书是中国林业科学研究院森林生态环境研究所主持,东北林业大学、中国科学院地理研究所、气象科学研究院农业气象研究中心等单位参加,经过4年的协作攻关完成的国家“八五”科技攻关项目“气候变化对中国社会的影响和对策”中“气候变化对林业的影响及适应对策”专题的研究成果。课题负责人是中国林业科学研究院森林生态研究所徐德应研究员,主要参加人是:阎洪、郭泉水、刘世荣、王风友、陈雄文、张清华、张福春、张养才、王兵、姚成滨。参加部分研究工作的有朱峰、李清林、郭和平、史作民、陈力。在1996年8月,受国家科委、农业部环保能源司委托,林业部组织的成果鉴定会上,专家组一致认为“该项研究总体达到国际先进水平,在气候变化对中国主要造林树种和濒危树种地理分布影响和对我国木本植物物候影响的研究方面处于国际领先地位”。1996年10月,气候变化对林业、农业、水资源及沿海地区海平面影响及适应对策研究,获得国家计委、国家科委和财政部联合颁发的国家“八五”科技攻关重大科技成果奖。

本专著共分八章,十九节。各章节的主要执笔人如下:

徐德应研究员(前言,第一章,第二章,第三章,第七章,第八章第一节),郭泉水副研究员(第三章,第七章,第八章第二节),阎洪副研究员(第二章,第三章),刘世荣研究员(第四章,第八章第二节),王风友教授(第五章),张福春副研究员(第六章第一节),张养才副研究员(第六章第二节)。参与撰写各章节部分内容的还有张清华,王兵,史作民,陈力,陈雄文,姚成滨。全书统稿由徐德应和郭泉水完成。

本项研究是在国家科委社会发展司的白宪宏、吕学都等同志的有效组织和支持下完成的,在此一并致谢。

徐德应

1997年7月

目 录

序言

前言

第一章 气候变化对世界森林影响的研究概况	(1)
第一节 温室效应与全球气候变化	(1)
第二节 世界森林消长与全球大气中二氧化碳的关系	(4)
第三节 大气中二氧化碳增长及气候变化对森林的影响研究进展	(5)
一、CO ₂ 浓度增加对木本植物生理生态影响的实验研究进展	(6)
二、气候变化对森林影响的宏观研究	(9)
三、结论	(15)
第四节 大气中二氧化碳浓度增加与林业发展对策	(15)
一、树木育种发展对策	(16)
二、森林经营和管理问题	(16)
第二章 气候变化对森林分布影响的框架模型	(26)
第一节 气候与森林分布的相关性	(26)
第二节 未来气候情景预测	(27)
第三节 气候变化对森林影响的框架模型——生态信息系统 GREEN	(28)
一、模型的构建过程和特点	(31)
二、软件的具体操作	(32)
第三章 气候变化对中国主要造林树种和珍稀濒危树种地理分布的影响	(35)
第一节 概论	(35)
第二节 气候变化对中国主要造林树种和珍稀濒危树种地理分布的影响	(36)
一、气候变化对兴安落叶松地理分布的影响	(36)
二、气候变化对红松地理分布的影响	(39)
三、气候变化对油松地理分布的影响	(42)
四、气候变化对杉木地理分布的影响	(48)
五、气候变化对马尾松地理分布的影响	(58)
六、气候变化对珙桐地理分布的影响	(64)
七、气候变化对秃杉地理分布的影响	(68)
第三节 结论与讨论	(70)
第四章 气候变化对中国森林生产力的影响	(75)
第一节 中国森林植被第一性生产力和生物量的分布格局	(76)
一、数据资料的收集和处理	(76)

二、生物量和净初级生产力的地理分布格局	(76)
三、凋落量和凋落物现存量的地理分布	(81)
四、层的生产力与环境条件的关系	(82)
五、物种生产力与群落结构间的关系	(84)
六、问题与讨论	(86)
第二节 中国森林第一性生产力的模拟	(86)
一、气候环境变量对生产力的相关模型	(86)
二、中国森林现实生产力的模拟	(90)
三、讨论	(91)
第三节 气候变化对中国森林生产力的影响	(91)
一、全球气候变化后中国气候情景综合评价	(92)
二、中国森林第一性生产力对气候变化的响应	(92)
三、讨论	(93)
第五章 二氧化碳浓度增加对红松和兴安落叶松幼苗生理生态的影响	(97)
一、试验条件及方法	(97)
二、试验结果	(98)
三、讨论	(102)
第六章 气候变化对中国树木物候及生育期的影响	(105)
第一节 气候变化对中国树木物候的影响	(105)
一、影响物候早晚的关键气象因子及其关键时期	(105)
二、未来气候变化对我国树木物候的影响	(107)
三、未来气候变暖后中国树木物候变化的数值估算	(108)
四、在气候变化对物候影响研究中物候变化规律的应用	(115)
五、小结	(116)
第二节 气候变化对我国杉木、毛竹生育期的影响	(116)
一、杉木、毛竹速生丰产的气候条件	(117)
二、杉木、毛竹速生丰产的气候问题	(119)
三、气候变化对亚热带地区杉、竹生产布局的影响	(121)
第七章 气候变化对森林结构的影响	(123)
第一节 气候变化对森林结构影响的研究进展	(123)
一、气候变化影响研究的三个层次	(123)
二、森林生态系统类型和气候的关系	(124)
三、物种数量与气候的关系	(125)
四、气候变化对森林生态系统结构的影响	(125)
第二节 气候变化对中国主要森林类型群落结构的影响	(126)
一、研究范围	(126)
二、气候变化对中国主要森林类型群落结构影响分述	(127)
三、结论	(136)
四、讨论	(138)

第八章 适应全球气候变化的中国林业对策	(141)
第一节 气候变化与森林生态系统变化的社会—经济影响	(141)
一、引论	(141)
二、气候变化对森林的主要影响	(141)
三、当前和未来对木材的需求和供应	(142)
四、森林生产力变化的社会—经济影响	(143)
五、结论	(144)
第二节 适应全球气候变化的中国林业适应对策探讨	(144)
一、良种选育对策	(145)
二、人工造林对策	(145)
三、天然次生林和原始林的经营对策	(147)
四、适应气候变化的间伐和轮伐期经营对策	(147)
五、森林生物多样性保护的适应对策	(148)
六、森林病虫害防治的适应对策	(150)
七、防火对策	(151)
八、结束语	(152)

第一章 气候变化对世界森林影响的研究概况^①

第一节 温室效应与全球气候变化

由于工业化和人类活动,近百年来大气中的温室气体大量积聚。目前的观测结果表明,大气中各种温室气体的浓度正在迅速增长。与这一情况对应的现象是,从1880年至今地面气温已升高了 $0.5\sim 0.7^{\circ}\text{C}$ 。当然,在这个总的升温过程中,仍有某些时期降温的现象。从全球增温来看,高纬度地区增温幅度较大,低纬度地区则不太明显。有人认为,当前的全球变暖及气候变化是与大气中的温室气体大量积聚直接有关的。根据大多数全球气候模型的预测,在未来100年中气温将增加 $1.5\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 。人们普遍担忧,如果这一发展趋势保持不变或者加剧,是否会危及到人类的生存环境,破坏全球生态系统,造成灾难性的结果。为此各国已有许多与全球变化有关的大型研究计划。其中与森林植被直接发生关系的计划有:人与生物圈计划(MAB),国际地圈与生物圈计划(IGBP),生物地球化学循环及其相互作用(BCTI),全球能量与水循环试验(GEWCE)等。在最有影响的IGBP计划中,与森林植被有直接关系的核心计划有:水循环的生物圈问题研究(BAHC)和全球变化与陆地生态系统(GCTE)。这些计划所研究的都是与全球气候变化有关的问题,其规模之大是前所未有的。

全球气候变化与全球大量温室气体排放、温室效应具有紧密的联系。为此我们首先对全球温室气体排放的现状,以及与此有关的温室效应和全球气候变化问题进行讨论。众所周知,大气中的主要成分是 N_2 (氮),但它们在地球的热量平衡和气候变化中起的作用不大。而某些微量气体,如 CO_2 (二氧化碳), CH_4 (甲烷), N_2O (氮氧化物),CFC(氟氯烃)等,虽然在大气中的含量很少,却能大量吸收来自地球的长波辐射,起着阻止地球向宇宙散失热量的作用,而目前人们最关心的是一些温室气体。表1-1列出了当前主要温室气体的状况。

CO_2 是所有温室气体中数量最大、影响最大的一种气体。据估计,大气中 CO_2 产生的温室效应约占全部温室气体总温室效应的61%。从1860年左右工业革命开始到现在,大气中的 CO_2 浓度^②已由 280×10^{-6} 上升到 353×10^{-6} ,增长26%。目前的年增长速度为 1.8×10^{-6} ,即0.5%。按目前的增长速度计算,到2050年大气中的 CO_2 浓度将达到 550×10^{-6} 。根据现有的研究确定,大气中 CO_2 的迅速增长主要是由于人类活动造成的,其中最主要的是由于工业的发展而大量使用化石燃料。据某些研究估计,从1850年到1980年由于化石燃料的燃烧约向大气中排放的碳量为1500~1900亿t(Dale V. H. et al,

① 本章由徐德应执笔,刘世荣、王凤友、陈雄文撰写了部分内容。

② 本文涉及化合物的浓度为化合物的体积分数,如 CO_2 浓度为 3×10^{-6} ,即 $\varphi(\text{CO}_2)=3\times 10^{-6}$ 。

1991)。

大气中 CO_2 的另一个重要排放源为森林的破坏。在 1850 到 1950 年间, 由于森林的破坏而排放的 CO_2 总量估计为 900~1200 亿 t (Houghton et al, 1990)。当然, 后一个数字的估计不太准确, 但当前大多数研究者认为, 由于森林破坏造成的 CO_2 排放仅次于化石燃料而居第二位。

尽管现已观测到大气中温室气体的浓度在迅速上升并观测到全球正在变暖, 但也有些科学家认为, 这还不足以证明目前温室气体的增长主要是人类活动造成的, 也不足以证明未来的气候一定会有大幅度增温。因为除了人类活动以外, 自然界也存在许多温室气体的源和汇。例如火山爆发是温室气体的一个很大的源, 海洋是一个很大的汇。此外, 土壤也可能是一个汇。对于这些源、汇的数量目前还不能准确的计算出来。气候变化是一个非常复杂的过程, 除了地球上的因素, 还有太阳变化和宇宙变化等因素。地球上的诸因素中还存在复杂的反馈作用。例如, 升温可使蒸发加强、云量增多, 而云量的增加则会阻挡太阳辐射, 起到降温的作用。火山爆发一方面会使大气增加大量的温室气体, 而同时排放出的大量气溶胶也会阻挡太阳辐射而使大气降温。

表 1-1 人类活动引起的温室气体的变化及其影响

温室气体	CO_2	CH_4	CFC-11	CFC-12	N_2	其 它
工业化前浓度 (1750~1800 年)	280 ($\times 10^{-6}$)	0.80 ($\times 10^{-6}$)	0 ($\times 10^{-9}$)	0 ($\times 10^{-9}$)	288 ($\times 10^{-12}$)	
目前浓度 (1990 年)	353 ($\times 10^{-6}$)	1.72 ($\times 10^{-6}$)	1280 ($\times 10^{-9}$)	484 ($\times 10^{-9}$)	310 ($\times 10^{-12}$)	
目前年变化量	1.8 ($\times 10^{-6}$)	0.015 ($\times 10^{-6}$)	10 ($\times 10^{-9}$)	17 ($\times 10^{-9}$)	0.8 ($\times 10^{-12}$)	
目前年变化速率 (%)	0.5	0.9	0.4	0.4	0.25	
预测浓度 (2050 年)	400~550 ($\times 10^{-6}$)	1.8~3.2 ($\times 10^{-6}$)	200~600 ($\times 10^{-9}$)	500~1100 ($\times 10^{-9}$)	350~400 ($\times 10^{-12}$)	
大气滞留期 (年)	50~200	10	65	130	150~170	
分子温室效应	1	21~25	17	500~20000	250	
相对温室效应	61%	15%		9%	4%	11%

气候变化不是一种新的现象。几十万年来气候变化在生物和非生物的演化过程中一直起着推动作用, 现在我们所面临的问题只是气候变化的速度比过去大得多。气候变化可以定义为地球气候各项因子如温度、降雨、风等的长期波动。这些波动通常与温室效应有关, 即空气中的水蒸气、二氧化碳、甲烷、氟氯烃以及其它的微量气体使得地球表面的温度升高。这些气体可使短波太阳光辐射穿过, 但对来自地球表面的长波红外辐射具有阻挡作用, 所以那些本该放射到宇宙空间去的红外辐射被保留在大气低层中, 造成大气增温。由于温室效应的作用, 地球表面的平均温度可达到 $+15^\circ\text{C}$, 而如果没有这种自然的温室效应, 地表温度应为 -18°C 。当前, 不断增加的温室气体正在增强这种升温效应。按照大部分模型的预测, 当全球大气中 CO_2 增长为当前水平的两倍时, 全球气温将上升 $1.5\sim 3.0^\circ\text{C}$ 。随着研究的深入, 研究结果仍在不断改进。全球环流模型 (GCM) 是预测未来气候很好的一种手段, 然而由于全球系统的复杂性, 各种 GCM 的预测还不能在近期内缩小其误差而达到一致的预测结果 (Cooter et al, 1993)。

CO_2 增长的长期影响是非常显著的, 因为全球平均气温持续增高最终将影响到海洋

一大气系统的大规模变化过程,而海洋一大气系统在全球气候中起着重要作用(Mamabe and Stouffer, 1993)。1994年由Yonetani和McCabe共同完成的“1985~1989年美国地区性温度变化的研究”结果表明,气候变化似乎并不是渐变,而是跳跃式地突然变化的。另外,温度变化的空间范围非常大,似乎与大气循环的变化有关。自1959年以来,在美国夏威夷Mauna Loa观测站观察到的大气中 CO_2 浓度已由 315×10^{-6} 增加到 353×10^{-6} (Keeling and Whony, 1992)。人类活动肯定提高了大气中的温室气体的浓度。由世界冰川监测机构编纂的数据分析表明,过去100年中冰川出现了全球性的后退。通过冰川对气候敏感性的计算分析表明,冰川后退是由于过去100年全球温度上升了 0.66°C 所造成的(Oerlemans, 1994)。从南极和丹麦格林兰岛收集到的冰核资料表明,大气中 CO_2 和 CH_4 的浓度与气温之间有着很强的相关性(Louius, 1989)。

在过去的100年里,全球平均气温增加了 $0.3 \sim 0.6^\circ\text{C}$ (Houghton et al, 1990)。有关全球变暖的每一项主要的科学评估都认为大气中 CO_2 的浓度倍增将使全球温度增加 $1.5 \sim 4.5^\circ\text{C}$ (IPCC, 1992)。然而,Lindzen(1994)则认为全球平均气温只能增加 $0.5 \sim 1.2^\circ\text{C}$,因为水蒸气是最重要的温室气体。他断定在大多数模型中可以明显地看出水气的反馈作用造成的计算误差。如果不考虑这种水气的反馈作用,GCM模型模拟出的温度都不超过 1.7°C (Arking, 1991)。另一方面有充分的证据表明,由于臭氧的减少,它本来会导致大气低层的辐射通量增加,但由于它同时将导致云层中硫化物凝结核的增加,从而使云层中的微粒数增多,其结果将会使大气低层的太阳辐射增温作用减少,因而起到了一个相反的作用(Isaksen, 1994)。1994年Tourmi等人也认为臭氧减少的间接影响可能是减少辐射的增温作用(通过增加云的反射作用),其间接的降温作用可能和直接的升温作用一样大。

IPCC最近对气温变化全面科学评估的结论是,如果要使大气中温室气体的浓度能稳定在工业革命之前2倍的水平上,温室气体的排放速度就必须远远低于1990年的水平。同时还得出一个结论,气溶胶对辐射的反作用将足以抵消全球温室气体的升温作用的一半,但这种效应的地理分布是不均匀的(IPCC, 1994)。IPCC在关于辐射作用问题上用了5个章节讲述了大气中的 CO_2 和碳循环、 CO_2 以外的其它温室气体的源与汇、气溶胶、温室气体和气溶胶对辐射的作用,以及全球变暖的可能性等。IPCC报告的作者们认为一些新的发现增加了人们的知识,但并没有根本改变1990年和1992年IPCC科学评价报告中提出的关于影响气候的因素的相对重要性的基本结论。1995年IPCC的第2次评价报告中提到的主要新发现可总结如下:

——全球变暖潜力(GWP)指标。与1992年IPCC报告中的GWP相比,大部分加大了 $10\% \sim 30\%$,新的GWP的不可靠性约为 35% 。

—— CH_4 全球变暖潜力(包括直接和间接作用):根据新的 CH_4 GWP来和人类活动所排放的 CH_4 量来计算,100年内 CH_4 的增暖作用明显低于 CO_2 ,在20年内两者的作用基本相同。

——大气中 CO_2 浓度的稳定性:一系列的碳循环模型表明,只有在全球人类活动造成的碳排放最终低于1990年水平时,大气中 CO_2 浓度才能稳定在现有状态的1~2倍间(相当于 $360 \times 10^{-6} \sim 750 \times 10^{-6}$)。

——通过改进后的气溶胶模型计算表明了自工业革命时期以来,由硫酸盐的悬浮微

粒和生物质燃烧后的气溶胶对辐射的负作用,如果按全球平均计算,能抵消相当一部分温室气体的正作用。然而对于负辐射作用的估计还很不确定,而且具有高度区域性,不能简单地认为它们能对温室气体的作用进行抵消。

——近来 CO_2 的低增长率并不是不正常的:与前 10 年的平均增长率相比,1991 年和 1993 年间大气中 CO_2 浓度增长率很慢。当然,自 50 年代以来,对 CO_2 的观察记录中也有类似低增长率的时期。在 1993 年下半年, CO_2 的增长率又有回升。

—— CH_4 增长率的剧烈减少:除在 1993 年下半年大气中 CH_4 出现增长现象之外,目前特别是在 1991 年至 1992 年出现了急剧减少现象。

——1991 年 6 月 Pinatubo 火山爆发,短期使平流层的气溶胶大量增加,导致大约 2 年内地表温度下降了 0.4°C ,这和全球平均变冷 $0.4\sim 0.6^\circ\text{C}$ 的模拟预测很符合。

第二节 世界森林消长与全球大气中二氧化碳的关系

森林和温室气体的关系主要是指森林和 CO_2 的关系。为了更清楚地了解森林在全球碳库和碳循环中的地位,在全球范围作一个大致的调查是很有必要的。据 Woodwell 的估计,全球大气中碳含量约为 7000 亿 t,植物中(其中森林占 90%)含有 8270 亿 t。陆地上腐殖质和泥炭中含碳总量约为 10000~30000 亿 t,海洋深水中的碳含量约 400000 亿 t。每年由于使用化石燃料向大气净排放碳量为 50 亿 t,火山爆发向大气中输送的碳量平均每年为 0.5 亿 t。根据理论计算海洋每年吸收的碳量约为 25 亿 t,大气中碳的年增加量为 23 亿 t。对森林的作用估计差异最大,约每年向大气排放 10~100 亿 t。

森林在其生长过程中吸收大气中的 CO_2 ,形成光合物质并把它保存起来。森林固定 CO_2 的速率与森林生物量的增长率成正比。森林被采伐和利用的过程是 CO_2 排放的过程。据估算,陆地植被在没有大量消除掉以前,其碳的总含量约为 9000 亿 t,约有一半储存在热带森林中。现在陆地植被碳总储量约为 5600 亿 t(Woodwell 的估计是 8270 亿 t)(Houghton et al, 1983)。1980 年由于植被破坏而造成的碳排放量仅次于在此期间由于化石燃料燃烧造成的碳排放量。这些估算数字虽然并不十分准确,但可以看出由于森林破坏造成的向大气的碳排放量是一个相当可观的数字。现在受到破坏并消失得最快的森林是热带森林。正是由于森林受到大面积破坏以至于从全球的角度来看,森林已成为大气中 CO_2 的重要排放源。

对由于森林砍伐造成的 CO_2 排放,已经有许多研究。70 年代初期以前,人们普遍认为全球的森林起到吸收全球大气中 CO_2 的作用。但 70 年代后期开始发表的大多数研究认为,由于全球森林受到破坏,森林正向大气释放它过去储存的碳,成为大气中 CO_2 的一个主要排放源。但是对其数量估计却有很大差异,从每年 4 亿 t 到每年 80 亿 t 碳不等。1977 年 Bolin 的估计为每年 10 亿 t。1978 年 Stuiver 根据木纤维中碳同位素的比例,估计从 1850 年到 1950 年从植物群落中放出的碳每年约为 12 亿 t。1978 年 Wong 估计为 15 亿 t。1979 年 Woodwell 等的估计为 40~80 亿 t。1979 年 Broecker 用几何模型来估计全球的碳平衡,结论是:与化石燃料相比,森林生物量的改变对大气中 CO_2 没有显著影响。1980 年 Chan 等人的估计为每年排放 9~18 亿 t。1981 年 Moore 等的估计为 21~47 亿 t。1982 年 Olsen 的估计为 19~48 亿 t。1983 年 Houghton 等对 1960~1980 年由于森林破

坏对大气中 CO_2 的影响进行了计算其结论是：1980 年的排放总量约为 21~47 亿 t。1984 年 Brown 等的估计每年 6.8~7.4 亿 t，1984 年 Mayers 的估计为每年 20~28 亿 t。1985 年 Detwiler 等估计每年小于 20 亿 t，1986 年重新估计值为 4.2~6.7 亿 t。1990 年 Houghton 等估计，从 1850 年到 1980 年由于森林破坏产生的总排放量为 900~1200 亿 t。1991 年 Hall 和 Uhlig 计算，1980 年全年由于森林的破坏可向大气排放 5.8 亿 t，但其误差为 ± 0.6 亿 t（徐德应等，1992）。

从以上文献来看，在最近的 15~20 年中，许多学者对由于森林破坏造成的 CO_2 排放量进行了许多研究。早期研究估算的年排放量为 10~15 亿 t。中期的研究，多数落在 20~80 亿 t 之间。近期的研究大致是 4~7 亿 t。这些研究的数字均没有得到一致的公认，更大规模和更深入的研究工作的研究无疑是非常必要的，因为到目前为止大气中 CO_2 的源和汇的数量还没有最后搞清楚。从 1850 年到 1980 年，按目前的估计由于森林的破坏向大气排放的碳大约为 2400~3100 亿 t。在此期间海洋吸收的碳约为 400~780 亿 t（Peng et al, 1984）。这样，大气中的碳累积应为 1620~2700 亿 t。而实际观测到的累积量为 1290~1720 亿 t，其差距还有 330~980 亿 t。这使人们怀疑到，是否还有其它的源、汇或者其它的流通机制没有考虑进去。这一问题的最后澄清，无疑对于森林在全球碳平衡中起什么样的作用这一问题的解决非常重要。

中国关于森林在 CO_2 平衡中作用的研究开始于 1989 年。由于中国地域广大，几十年来森林资源的情况变化很大，所以中国森林的情况以及它与 CO_2 排放的关系，比较受国际上的重视。过去 40 多年中我国森林的总面积没有大的波动，但是在 1991 年以前中国森林蓄积量在不断下降，总的蓄积生长量低于采伐量。另一方面，中国的人工林面积居世界首位，人工林面积的增长速度是世界上最快的。从 1949 年到 1989 年，全国造林的已成林面积达 3101 万 hm^2 。在这样的情况下，中国森林对大气中 CO_2 平衡的贡献更加引人注目。

根据中国 1976~1981 年和 1984~1988 年两次全国森林资源清查资料、全国木材消耗结构的调查资料，以及森林蓄积与森林生物量比例的关系的数据，我们分别用一个简单模型和国外的一个 COPATH 模型计算出 1984~1988 年间我国森林对于大气碳平衡贡献的平均值。计算结果为，在 1984~1988 年间中国森林平均每年净吸收碳量 250 万 t（徐德应 1991）至 2800 万 t（Xu, 1993）。这两个计算结果差异达 10 倍以上，所以计算的方法有待进一步改进。

第三节 大气中二氧化碳增长及气候变化 对森林的影响研究进展

从 1860 年左右到现在，大气中 CO_2 浓度已由 280×10^{-6} 上升到 353×10^{-6} ，目前正以每年 0.4% 的速度继续增长。根据某些预测，到 2050 年以后大气的 CO_2 浓度将会是现在的 2 倍（Bolin et al, 1986）。不管 CO_2 和其它温室气体浓度的增长是否会导致明显的气候变化，大气中 CO_2 浓度增长本身也足以能引起对植物影响。关于大气中 CO_2 浓度增倍后对气候有什么影响，现在世界上已有一、二十个大型的气候预测模型。预测的结果各不相同，至今没有任何一个模型被公认为是“非常可靠”的。对气候变化的影响，现

在大量的基础性研究工作正在广泛地开展。它们可以大致分成二类：①生理生态的实验研究；②宏观的研究。

一、CO₂ 浓度增加对木本植物生理生态影响的实验研究进展

CO₂ 浓度增加和气候变化，直接影响到树木的生理活动和生化反应途径，进而影响到树木的生长、林分结构、生物生产力、森林轮伐期以及树种的分布范围。在 70 年代末期以前，国外虽有一些关于 CO₂—植物关系的研究，但当时大气中 CO₂ 浓度迅速增长对植物影响的问题并没有引起人们的注意。直到 70 年代末期以后，有关方面的研究才逐渐引起人们的注意。

关于 CO₂ 浓度对植物的影响，Kimball 于 1983 年分析了 37 种植物的 430 项试验结果 (Kimball, 1983)。Strain 和 Cure 于 1985 年总结了 1100 种文献。大部分研究结果表明 CO₂ 浓度增加有促进植物生长的作用。但几乎所有数据都来自温室实验，大部分是一年生植物。对多年生植物的研究通常只限于很短时间的观测。

1975 年有人采用开顶同化室进行了田间试验。现在美国至少有 10 处以上的类似试验，应用这种技术。主要研究对象是矮小的农作物，但也有用于树种研究的。从 90 年代开始发展了野外 CO₂ 加气设备 (free-air CO₂ enrichment-FACE)。由于这种技术在植物周围没有墙壁的阻碍，所以避免了箱壁效应。目前美国正计划对森林树种进行 FACE 试验。新西兰也正计划用这种技术来研究牧草 (Dahlman, 1993)。

试验证实，实验室中所得的结果，包括光合作用和生长量与野外实验（包括开顶同化箱和 FACE 的）结果相当吻合，并具有大致相同的数量值。

近年来发表的一大批研究结果，使人们对大气中 CO₂ 浓度增加与植物（包括林木）的关系有了新的认识。现将主要的实验研究结果分述于下。

1. CO₂ 浓度增加对木本植物的形态和生长的影响

这方面的试验大多是在人工环境下进行的短期试验。Rogers 等 (1983) 在试验中发现，当 CO₂ 浓度达到 910×10^{-6} 时，火炬松与美国枫香的幼苗干重增加了 40%。另外，Tolley 和 Strain (1984) 以及 Sionit (1985) 的试验发现这两个种的干重，随着 CO₂ 浓度的抬升均有明显增加。Sionit 和 Kramer (1984) 对 15 种幼苗的试验结果进行了总结，得出的结论是：①在 $400 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$ 范围内，幼苗的干重、茎粗、幼苗高等，通常是随着 CO₂ 浓度升高而增加；②在 CO₂ 浓度从 500×10^{-6} 提高到 600×10^{-6} 的过程中，增长量较小，有时甚至还会减小；③不同种的幼苗表现存在差异，需单独进行研究；④高浓度 CO₂ 对一些种在形态上产生影响，导致分枝增多，叶面积、叶片厚度增大；⑤在 CO₂ 浓度增加的过程中，不同种幼苗的竞争能力受到不同程度的影响。

高浓度 CO₂ 对根系无直接影响，但由于合成的碳水化合物向根部输送量增大，间接地会促使根系的生长加快。同时，豆科树种的根系将增加对氮的固定。CO₂ 浓度抬升所引起的温度上升和土壤水分的变化也将影响到根系的生长。

CO₂ 浓度抬升将明显地促进树木的生长，其增加范围随树种及环境因素的制约程度而异。CO₂ 浓度增加将部分地补偿低光照、高温、水分和矿物质短缺的作用，但不利因素

如干旱、极端温度以及不利的土壤条件仍然会限制树木的生长。然而,对具有重要经济价值的树种的影响需要长期的研究,国外许多科研单位如美国的杜克大学的人工气候室,正在从事这方面的攻关实验。

2. CO₂ 浓度上升对木本植物生理生态方面的影响

(1) 光合作用 许多短期的生理试验表明,CO₂ 浓度抬升,光合速率升高。如果目前大气中的 CO₂ 浓度尚未使光合速率达到最大值。那么,CO₂ 浓度升高会促进光合作用。Kramer 和 Sionit(1986)认为在 C₃ 植物卡尔文循环中,CO₂ 通过二磷酸核酮糖羧化酶(RuBp 羧化酶)被固定到三碳磷酸甘油酸上。这种酶对 CO₂ 和 O₂ 均有亲和力,既作羧化酶又作氧化酶。叶子周围 CO₂ 浓度增大导致叶内 CO₂ 浓度升高,增加了这种酶的羧化作用活性,使得光合作用增加。

提高叶子周围 CO₂ 浓度可以补偿蔽荫和高温。在高浓度 CO₂ 条件下,光合速率的绝对最大值出现在光饱和点处,而相对最大值则出现在低光照下。因而,对林冠低层和林地的植物来说,高浓度的 CO₂ 显得格外重要。对一些 C₃ 植物而言,光合作用的最佳温度是随着 CO₂ 浓度增大而上升,这在 CO₂ 浓度抬升导致气温升高时尤其重要。Wullschlegel 等(1992)进一步试验表明,北美鹅掌楸和美国白栎幼苗在 300×10^{-6} 时,叶内叶绿素含量比在正常条件下分别减少了 27% 和 55%。同时,类胡萝卜素和叶黄素的总量在这两种幼苗的叶子中减少了 21% 和 37%。

光合作用增强,呼吸作用减弱,碳水化合物增多,使得生物量增加。但有时间接影响也很重要,因为生物量并非一定随着光合速率增大而增加,还与叶的总面积及光合作用时间密切相关。

光合适应现象是指环境中 CO₂ 浓度增高时,一开始植物的光合作用随之提高,但经过一段时间的适应,光合速率便发生变化。由于植物对 CO₂ 新状态具有适应性,从而使光合反应变的很复杂,如有些植物是“上调式适应”(up-regulation),还有些植物是“下调式适应”(down-regulation)。

Arp 综合分析了大量资料,发现种植在小型容器中的植物为“下调式适应”,而在大容器中的植物有“上调式适应”,研究的结果与容器大小有关系。所以近年来 FACE 试验越来越受重视。

“上调式适应”在 CO₂ 浓度增高的情况下,生物量是增加的,令人费解的是,某些“下调式适应”的植物在 CO₂ 浓度增高时生物量也增加。光合适应现象已经引起许多植物生理学家的注意,但目前对其了解得很少。

(2) 呼吸作用 Wullschlegel 等(1991)报道,北美鹅掌楸和北美白栎幼苗当 CO₂ 浓度上升时,暗呼吸明显下降。由于 CO₂ 浓度抬升,使二磷酸核酮糖羧化作用增强,氧化作用减弱,而这种氧化作用控制着光呼吸,因而使得植物体的光呼吸减弱。

(3) 气孔导度 在许多试验中,CO₂ 浓度增加会使气孔部分地关闭,从而减少 CO₂ 向叶的内部和水分向外运动。Roger 等(1983)将美国枫香暴露在 CO₂ 浓度增大一倍的室外条件下,试验结果表明气孔导度减小了 40%。Tolley(1982)在室内试验结果表明,糖胶树气孔导度减小达 50%,但是,当 CO₂ 浓度从 350×10^{-6} 抬升到 675×10^{-6} 时,火炬松并非如此。Beadle 等(1979)报道了 CO₂ 浓度从 20 到 600×10^{-6} 过程中,北美云杉的气